

Le brassage génétique et sa participation à la diversité des êtres vivants

Les êtres vivants se caractérisent par leur capacité à se reproduire. Chaque individu hérite des caractères de leurs parents, cependant il présente des différences avec ses parents, ses frères et sœurs.

Les gènes des parents sont transmis aux enfants par l'intermédiaire des chromosomes

Comment le brassage génétique participe-t-il à la diversité des génomes ?

I- La méiose assure le passage du stade diploïde au stade haploïde.

La méiose est une suite de deux divisions cellulaires précédées d'une seule réplification d'ADN au cours de l'interphase.

Avant la première division, l'ADN est dupliqué, la cellule contient $2n$ chromosomes bichromatidiens

La première division de la méiose réalise la réduction du nombre de chromosomes.

Pendant la **prophase I** (phase la plus longue, jusqu'à 90% de la méiose), il y a :

- condensation des chromosomes homologues bichromatidiens
- appariement des chromosomes homologues qui forment des paires et constituent des tétrades. Les chromosomes se croisent en plusieurs endroits sur leur longueur. Ces croisements sont appelés des **chiasmata**.
- Les chromosomes migrent vers la plaque équatoriale.

Durant la **métaphase I** :

- les chromosomes homologues sont alignés sur la plaque équatoriale
- les fibres du fuseau qui partent de chaque pôle se fixent à chaque chromosome d'une même paire.

Durant l'**anaphase I**, les fibres du fuseau déplacent les chromosomes bichromatidiens en direction des pôles. Les chromatides sœurs restent liées à chaque chromosome.

Durant la **Télophase I**, les deux cellules s'individualisent et reçoivent donc chacune n chromosomes bichromatidiens. Chaque cellule fille est donc haploïde.

Un sillon de division apparaît dans la cellule animale, une plaque cellulaire existe chez les végétaux.

La deuxième division de la méiose est une mitose classique.

Elle ne modifie pas le nombre de chromosomes (n), mais rétablit simplement l'état monochromatidien.

Durant la **prophase II**, un nouveau fuseau se forme et les chromosomes se déplacent vers la plaque équatoriale.

A la **métaphase II**, les chromosomes s'alignent sur la plaque équatoriale.

A l'**anaphase II**, les centromères des chromatides sœurs se séparent et les chromatides se déplacent vers les pôles opposés de la cellule.

A la **télophase II**, il y a 4 cellules filles possédant chacune un nombre haploïde de chromosomes.

Une cellule à $2n$ chromosomes donne naissance à 4 cellules à n chromosomes qui deviendront des gamètes, des grains de pollens, des spores, selon les organismes.

II- La variation génétique chez les descendants.

A- L'enjambement pendant la méiose I.

Durant la prophase I, les chromosomes homologues bichromatidiens s'apparient en **tétrades**. Les gènes correspondants sur chaque chromosome homologue sont alignés face à face.

Au cours d'un enjambement (**chiasma**), les molécules d'ADN des 2 chromatides non sœurs (1 paternelle et 1 maternelle) se rompent au même endroit et se recollent après échange. Ce processus est appelé **crossing-over**. Il en résulte une nouvelle combinaison de gènes paternels et maternels. Les chromosomes produits sont des **chromosomes recombinés**.

Chez l'Homme, on compte 1 à 3 enjambements par paire de chromosomes. Il constitue une source importante de variation génétique chez les organismes à reproduction sexuée.

Cela conduit à un **brassage intra chromosomique**.

B-L'assortiment indépendant des chromosomes.

L'orientation aléatoire des paires de chromosomes à la métaphase de la méiose I crée une variation génétique.

Elle déterminera quels chromosomes homologues paternels ou maternels se retrouveront dans les cellules haploïdes.

Chaque cellule fille contient une des combinaisons possibles des chromosomes paternels et maternels.

Au cours de la méiose se succèdent deux **mécanismes de ségrégation** (disjonction) des **chromosomes** (anaphase I et télophase I) et des **chromatides** (méta II, ana II, télophase II)

Durant l'anaphase I de la méiose, les chromosomes homologues de chaque paire migrent vers un pôle différent mais non prédestiné. Cette migration indépendante des chromosomes homologues conduit à un **brassage inter chromosomique**.

L'assortiment indépendant des chromosomes et l'enjambement constituent une source importante de variation génétique.

C- Fécondation et variabilité.

Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle s'unissent de manière aléatoire. Elle permet de réunir au sein d'un même noyau, 2 lots complémentaires à n chromosomes provenant de 2 gamètes de la même espèce.

A l'issue de la fécondation, le zygote (= cellule œuf) possède deux lots de n chromosomes homologues, l'un d'origine paternelle, l'autre d'origine maternelle.

Il est donc diploïde ($2n$ chromosomes).

La nature aléatoire de la fécondation augmente la variation génétique.

D- Méiose, innovation et évolution.

Au cours de la méiose des anomalies peuvent survenir et être à l'origine de modifications :

- **du nombre de chromosomes** présent dans les gamètes.

Une non disjonction des chromosomes homologues au cours de la prophase de première division entraîne la **formation de gamètes à $n+1$ ou $n - 1$ chromosomes**.

Après fécondation, la cellule œuf possède 1 ou 3 exemplaires d'un même chromosome. On parle de monosomie ou trisomie. La plupart sont létales mais quelques-unes sont viables (trisomie 21)

- **de la structure des chromosomes.**

Au cours du crossing-over inégal, lorsque le chromosome se rompt, 4 types de modification peuvent se produire (une délétion, une duplication, une translocation ou une inversion)

Les fragments de chromatides se brisent et se rattachent au mauvais endroit, une des chromatides perd des gènes alors que l'autre en reçoit trop.

Résultat final : un chromosome avec une délétion, un chromosome avec une duplication.

Ces mécanismes peuvent être la **source de diversification du vivant**.

Reprise du TP

La comparaison des séquences nucléotidiques des gènes des opsines montre de nombreuses similitudes. Le gène de l'opsine rouge ne présente que 2% de différence avec celui des opsines vertes, soit 98% de similitudes. Les gènes des opsines vertes et rouges présentent 40 % de différences avec le gène des opsines bleues, soit 60% de similitudes.

On considère que 2 gènes qui présentent au moins 20% de similitudes dérivent d'un même gène ancestral.

Ce sont des **gènes homologues**. Ces gènes dérivent d'un même gène ancestral, ils appartiennent à une famille multigénique.

Les gènes codant pour les opsines des pigments visuels sont des **gènes homologues** et forment une **famille multigénique**.

Les gènes homologues (copies identiques à la base) résultent de la **duplication** d'un gène unique ancestral et qui se serait intégré en un autre endroit du génome.

Ces copies de gènes restent soit identiques, soit subissent des mutations. Elles peuvent ensuite se retrouver sur le même chromosome ou se retrouver sur un autre chromosome. Dans ce cas il a **transposition**.

Chaque nœud de cet arbre correspond à une duplication génique, suivie d'une évolution indépendante des deux duplicata par fixation de mutations différentes (les mutations apparaissant au hasard). La première duplication est associée à une translocation, elle marque la séparation du gène codant pour l'opsine sensible au bleu du gène qui conduira à l'ensemble vert/rouge. La deuxième duplication est plus récente elle explique l'apparition de deux gènes l'un sensible au vert l'autre sensible au rouge

La réalisation correcte de l'alternance méiose fécondation est indispensable pour assurer la stabilité chromosomique entre les différentes générations.

Les individus les mieux adaptés à leur milieu ont le plus de descendants. L'accumulation des variations héréditaires favorisées par le milieu est rendue possible par la sélection naturelle

III- Les autres mécanismes de diversification.

Mutations, brassage génétique et fécondation ne suffisent pas à expliquer une telle diversité des êtres vivants. Il existe d'autres mécanismes qui permettent de créer de nouvelles espèces ou d'en augmenter la variabilité.

A- La diversification des êtres vivants résulte de modifications génétiques.

1- La modification caryotypique.

La **polyploïdie** est une anomalie chromosomique qui est à l'origine de la présence de plus de deux jeux de chromosomes dans les cellules.

Ce phénomène très fréquent chez les végétaux et plus rare chez les animaux.

Ex : cas du rat-viscache roux ($4n$)

Ex : banane, pomme de terre, ... ;

La polyploïdie peut se produire :

- soit naturellement (autopolyploïdie)

Elle résulte de la production de gamètes non réduits ($2n$). La fusion de gamètes à $2n$ conduit à une cellule œuf à $4n$.

Un individu tétraploïde peut résulter de l'absence de division

- soit par croisement (hybridation) entre 2 espèces différentes (allopolyploïdie).

Les hybrides sont stériles mais après un traitement, on peut réaliser un doublement des chromosomes et obtenir un hybride fertile.

2- Le transfert horizontal de gènes.

Des organismes sont capables de transférer de l'ADN à d'autres organismes n'appartenant pas à la même espèce de manière volontaire ou accidentelle. On parle de **transferts horizontaux de gènes**.

Les transferts horizontaux de gènes s'effectuent :

- **de bactéries à bactéries**
- **de virus à bactéries ou cellules eucaryotes**
- **de cellules eucaryotes à cellules eucaryotes.**

Chez les bactéries ce phénomène est fréquent.

Le transfert de gènes a lieu suivant 3 mécanismes : la transduction, la recombinaison ou la transformation (captation de gènes issus d'un organisme mort par une autre bactérie).

De nombreux organismes comportent des gènes qui proviennent d'espèces très éloignées telles que des bactéries, virus,...

Ces transferts horizontaux sont des événements rares.

Ex : les algues du genre porphyra sont utilisées pour les sushis. Des bactéries marines présentes sur l'algue possèdent une enzyme capable de dégrader la porphyrine (présente dans la paroi de l'algue). MEV dans la flore intestinale des japonais de bactéries plebeius ayant incorporé le gène qui produit la pophyrinase. Digestion des sushis par es japonais.

Les transferts de gènes peuvent s'effectuer avec des virus. C'est le cas des cellules placentaires de mammifères.

Ex : le syncytiotrophoblaste est à l'origine du placenta. Le placenta, organe étranger est toléré par la mère. Des retrovirus endogènes (ERV) serait impliqués dans ce processus.

Lors de la pénétration des virus dans une cellule, il y a fusion des membranes grâce aux protéines syncytine Il possède 2 protéines : les syncytines 1 et 2, impliquées dans la fusion nucléaire. Des syncytines sont synthétisées par les cellules du syncytiotrophoblaste et sont indispensables au déroulement de la grossesse. Ces syncytines seraient le résultat de l'expression de gènes intégrés dans le génome humain à partir des retrovirus endogènes.

<http://acces.ens-lyon.fr/evolution/evolution/accompagnement-pedagogique/accompagnement-au-lycee/terminale-2012/diversification-genetique-des-etres-vivants/transfert-viral/retrovirus>

Des transferts de gènes peuvent s'effectuer entre 2 eucaryotes qui vivent en étroite relation (endosymbiose).

Ex : **L'Elysia chlorotica** est une limace de mer ayant la forme d'une feuille verdâtre. Sa couleur est due à la présence de chloroplastes dans les cellules épithéliales de son appareil digestif très ramifié.

Ces chloroplastes ont été acquis par le mollusque au cours du passage de la forme larvaire à la forme adulte juvénile en consommant des filaments d'une algue, Vaucheria littorea.

Les chloroplastes du Mollusque d'origine algale demeurent fonctionnels pendant toute la vie du Mollusque.

C'est un exemple **d'endosymbiose entre un animal et des chloroplastes d'une algue** (et non avec une algue entière avec cytoplasme et noyau).

Les chloroplastes sont soumis à un renouvellement permanent de leurs constituants, notamment de leurs protéines membranaires des thylakoïdes. Si un certain nombre de protéines chloroplastiques sont codées par des gènes chloroplastiques (ADN chloroplastique), la majorité l'est par des gènes nucléaires. Les protéines sont ensuite transférées du cytoplasme aux chloroplastes. Cela soulève le problème de ce qui cause la pérennité des chloroplastes dans les cellules du mollusque en l'absence de gènes nucléaires de l'algue. Les études récentes indiquent que certains gènes nucléaires codant pour des protéines chloroplastiques se trouvent dans le génome du mollusque.

PsbO est un gène qui code pour une protéine MSP (protéine stabilisatrice du manganèse) essentielle à la photosynthèse. Elle est codée par un gène présent chez tous les organismes photosynthétiques, situé normalement dans le noyau des cellules et absent du règne animal.

Cela signifie qu'au cours de l'histoire de l'association entre Elysia et Vaucheria , il y a eu un transfert de gènes du noyau de l'algue à celui du noyau du mollusque. C'est un exemple de **transfert horizontal de gènes entre deux eucaryotes...** mais on n'en connaît pas le mécanisme.

<http://acces.ens-lyon.fr/evolution/evolution/accompagnement-pedagogique/accompagnement-au-lycee/terminale-2012/diversification-genetique-des-etres-vivants/symbiose-et-transfert-horizontal-des-genes/documents>

3- La modification de l'expression des gènes du développement

Les modifications que subissent certaines espèces sont causées par des anomalies de développement. Ces altérations peuvent résulter d'un dysfonctionnement des gènes dits « gènes du développement ».

Ces gènes sont présents chez de nombreux organismes et présentent des similitudes de forme et de fonctions.

La présence des mêmes gènes homéotiques chez des organismes aussi différents suggère que les différences morphologiques ne sont pas directement liées à des différences entre génome.

Une mutation de ces gènes entraîne une transformation d'une structure par une autre.

Ex : des pattes à la place d'antennes ; deux paires d'ailes

Des modifications dans la durée d'expression des gènes ou dans le blocage de cette expression lors des processus de développement peuvent induire des modifications dans la taille des structures dont la mise en place est pilotée par ces gènes

(Nanisme du cerf de Crête qui peut s'expliquer par l'arrêt de l'expression des gènes au stade juvénile)

(Autres exemple : Oursin du genre *Hagenowia* ; taille du museau de différentes races de chiens ; forme du crâne humain et chimpanzé...)

En ce qui concerne l'évolution de l'homme, le développement du crâne est plus lent et moins de stades sont atteints. Donc l'homme présente des caractères « juvéniles » à l'état adulte, caractères qui auraient précisément permis le développement de certains caractères de l'*Homo sapiens*.

En effet, le crâne humain (à part le menton) ressemble plus au stade fœtal du crâne de singe que le crâne de singe adulte ne ressemble au stade fœtal de sa propre espèce.

http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/anthropologie/d/anatomie-comparee-de-lhomme-et-du-singe_694/c3/221/p7/

Des formes vivantes très différentes peuvent résulter de variations dans la chronologie et l'intensité de l'expression des gènes homéotiques

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-selection-VIH-pinsons-Darwin.xml>

B-La diversification dont l'origine n'est pas une modification génétique.

1- La symbiose.

Certaines espèces sont capables de s'associer de manière plus ou moins durable et d'en tirer des bénéfices réciproques. Cette étroite association qui doit être renouvelée à chaque génération est appelée symbiose.

Ex : les mycorhizes (champignon et racine d'une plante)

Ex : les coraux (algue et polype)

http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/10/02/la-grande-barriere-de-corail-a-perdu-la-moitie-de-ses-coraux-depuis-1985_1768896_3244.html

Ex : les lichens (algue et champignon)

Les symbioses sont à l'origine de nouvelles fonctions.

Cette association à bénéfice réciproque, permet la diversification d'espèces qui seule ne pourraient pas se développer ou qui seule se développerait moins bien.

Exemple : association entre un champignon qui capte l'eau et les sels minéraux du milieu et une algue qui produit les matières carbonées. Cette association peut vivre dans des milieux très pauvres (à La Réunion l'espèce *Stéréocaulon vulcani* est une espèce pionnière des coulées récentes). Le lichen n'est ni un champignon ni une algue mais une association algue - champignon. Il s'agit donc d'une nouvelle espèce.

2- La transmission des comportements nouvellement acquis.

Chez les vertébrés, les comportements non innés (chant du pinson, utilisation d'outils chez les primates, ...) s'acquièrent par apprentissage et sont transmis à la génération suivante de manière non génétique. Ces processus enrichissent la biodiversité.

Pour en savoir plus :

http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2498_chimpanzes_pieges.php

<http://planete.gaia.free.fr/animal/ethologie/culture.chimpanzes.dossier.html>

Bilan

Le remaniement des chromosomes au cours de la méiose, les mutations aléatoires des gènes, la rencontre hasardeuse des gamètes sont à l'origine de la diversité des êtres vivants sur Terre. Cependant cela ne suffit pas à expliquer la totalité de la diversification des êtres vivants.

D'autres mécanismes d'origine génétique (modification du caryotype, transfert horizontal de gènes, modification de l'expression des gènes du développement) ou non génétique (symbiose, transmission de comportements) sont sources de diversité.